

連続的データ同化法（VCA 法）を用いた室内環境推定手法の開発
（第 7 報）ソース・レセプター関係を用いた初期推定場の作成
Development of the Method to Estimate Indoor Environment using Variational Continuous
Assimilation Method
(Part 7) Set up of initial estimation field by using source-receptor relationship

正会員 ○松尾 智仁（大阪大学） 正会員 嶋寺 光（大阪大学）
正会員 近藤 明（大阪大学）

Tomohito MATSUO*¹ Hikari SHIMADERA*¹ Akira KONDO*¹

*¹ Osaka University

In order to evaluate a contribution of unknown heat sources and to improve accuracy of CFD simulation of indoor thermal environments, variational continuous assimilation (VCA) method can be applied. In this study, source-receptor (SR) method was also applied to improve the estimates of VCA method. The methods were validated by a numerical experiment, and confirmed that VCA method cooperated with SR method can estimate the temperature fields of indoor environment including unknown heat source.

はじめに

本研究では、室内の温熱環境や空気質をより高精度に推定することを目的とし、そのために連続的データ同化法（Variational continuous assimilation method: VCA 法）と呼ばれる手法を用いている。VCA 法は、少数の観測データを CFD（Computational Fluid Dynamics）に融合することで、CFD の誤差を修正する手法である。

筆者らはこれまで、VCA 法を用いた室内の汚染源・熱源の位置の推定について研究を行ってきた。特に前報¹⁾では、壁面貫流熱が未知である場合でも発熱量と温度分布が推定可能であることを示した。

しかし、VCA 法は観測された誤差の原因を探索するために CFD により得られた流れ場を用いる手法であるため、CFD により得られた流れ場に大きな誤差があると推定精度が著しく低下してしまうという欠点がある。そのため、例えば未知の熱源の発熱により上昇気流が生じている場合などは、精度の良い推定が望めない。

そこで本研究では、VCA 法による推定の初期値を作成するために、ソース・レセプター関係を用いた別のデータ同化法の利用を提案する。ソース・レセプター関係とは、固定された流れ場を仮定することで成立する、熱源と温度分布の間の線形関係のことである。加藤ら²⁾は、室内の各熱源が温度分布に及ぼす寄与率を表す CRI と呼ばれる指標を提案しているが、同指標も固定された流れ場を仮定することでソース・レセプター関係を用いている。CRI は熱源分布から室内温度分布を推定するための指標であるが、本研究では観測された室内温度から熱源分布を逆

推定する。ソース・レセプター関係を利用した逆推定手法は複数あり、Cai ら³⁾、Keats ら⁴⁾などが汚染物質放出源の推定にソース・レセプター関係を用いている。

一般に、汚染物質が希薄ガスとみなせる場合、その濃度分布は流れ場に影響を与えないと仮定できる。一方、室内の温度分布は、浮力を通じて流れ場に影響を与える。したがって、固定された流れ場を仮定するソース・レセプター関係を用いて室内温度場を推定すると、浮力の影響が強い箇所では誤差が生じる。本研究ではソース・レセプター関係もちいた逆推定はあくまで VCA 法を適用する前処理として適用し、その後 VCA 法が正確な推定を行うものであるため、推定前よりも正解値に近い場が得られるのであれば、必ずしも推定結果が正確でなくても差し支えない。

以下、本研究で用いた手法を紹介し、その後、本手法の有効性を検証するために行った数値実験の結果を示す。

1. データ同化の方法

1.1 VCA 法

数値実験では、室内に未知の熱源があることを想定している。未知の熱源の寄与を含めた室内の温度分布、速度分布については、室内の複数箇所における温度データを用いて VCA 法により推定した。VCA 法の基本式の詳細は前報¹⁾に示しているためここでは割愛する。

1.2 SR 法

前報¹⁾まででは、未知の熱源が存在しない場合（発熱量が 0 である場合）の温度場・速度場を VCA 法による推定の

初期値としていた。しかし、本報では、初期値の誤差を低減させることを目的とし、ソース・レセプター関係を用いた逆推定で推定初期値を作成する。以下、本報で用いるソース・レセプター関係を用いた逆推定手法を SR 法と言う。SR は Source-receptor の略である。ソース・レセプター関係は式 (1) で表される。

$$Aq = \Delta T \quad (1)$$

ここで、 A はソース・レセプター関係を表す行列。 q は熱源分布を表すベクトル、 ΔT は温度センサのある位置における、熱源が無い場合を基準としたときの温度上昇を表すベクトルである。なお、 q 、 ΔT がベクトルであるのは、それらが空間分布を持つためである。熱源の数を N 、温度センサの数を M とすると、 A は $M \times N$ の行列である。

熱源がない場合の温度分布、および熱源 1 つだけが 1 単位の発熱をした場合の温度分布を CFD シミュレーションにより求めることで、行列 A を求めることができる。例えば、 n 番目の熱源が 1 単位の発熱をした場合に、各温度センサにおいて温度上昇 ΔT が観測されたとき、ソース・レセプター関係は式 (2) で表される。

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} & \cdots & a_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1} & \cdots & a_{m,n} & \cdots & a_{m,N} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M,1} & \cdots & a_{M,n} & \cdots & a_{M,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \vdots \\ \Delta T_m \\ \vdots \\ \Delta T_M \end{pmatrix}$$

$$\Leftrightarrow a_{1,n} = T_1, a_{2,n} = T_2, \dots, a_{M,n} = T_M \quad (2)$$

ここで、 $a_{m,n}$ は行列 A の成分、 T_m は位置 m における温度である。1 から N までのすべての熱源について、1 単位の発熱をしたときの温度上昇を求めることで、行列 A のすべての成分を求めることができる。

行列 A が既知である場合、未知の熱源の組み合わせ q' が存在する場合の温度上昇 $\Delta T'$ から、式 (6) が導かれる。

式 (6) を解けば q' が得られるが、 A の逆行列を用いて式 (6) を直接解く方法では、 $\Delta T'$ に誤差が含まれる場合不安定となる。そこで、式 (7) のように評価関数を定義し、式 (8) に示す最急降下法により評価関数を最小化する熱源の組み合わせを繰り返し計算により探索する。式 (8) 中の勾配は、式 (9) により求められる。

$$Aq' - \Delta T' = 0 \quad (6)$$

$$I = \frac{1}{2} (Aq'_k - \Delta T')^T (Aq'_k - \Delta T') \quad (7)$$

$$q'_{k+1} = q'_k - \left. \frac{\partial I}{\partial q'} \right|_{q'=q'_k} \quad (8)$$

$$\frac{\partial I}{\partial q'} = (A)^T (Aq'_k - \Delta T') \quad (9)$$

ここで、 $(\cdot)^T$ は行列またはベクトルの転置であり、 q'_k は k 回目の繰り返し計算における q' である。

SR 法の適用では、行列 A の算出のために $N+1$ 回の CFD シミュレーションを行う必要がある (N 個の熱源のそれ

ぞれ 1 つだけが存在する場合と、熱源の存在しない場合)。一方、ひとたび A が算出された場合、任意の $\Delta T'$ から速やかに q' を求めることができる。

1.3 データ同化の流れ

本報での、少数の観測データから未知の熱源分布と室内の温度分布を推定するための手順を以下に示す。

- 1) 未知の熱源のそれぞれについて、熱源が無い場合と熱源 1 つだけが 1 単位の発熱をする場合について CFD シミュレーションを行い、式 (2) より行列 A を求める。
- 2) 室内の温度観測データからベクトル $\Delta T'$ を求め、式 (8) より未知の熱源分布 q' を推定する
- 3) 推定した熱源分布を用いて CFD シミュレーションを行い、温度場と速度場を求める。
- 4) 推定した熱源分布を初期値として、VCA 法を用いて観測された温度データを同化し、精確な熱源分布と温度・速度分布を推定する。

ここで、4) の手順が必要である理由は、SR 法は熱源寄与の線形性を仮定しているため、SR 法単独では浮力に起因する流れ場の変化、およびそれによる温度葉の変化を考慮できないためである。

2. 数値実験

2.1 対象領域

数値実験では、3 次元室内空間を対象に、室内に熱源の発熱強度が未知であるとして、その発熱量と室内温度分布の推定を行った。

対象領域を Fig.1 に示す。領域は 7.5 m 四方、高さ 2.6 m である。東西を X 方向、南北を Y 方向、鉛直方向を Z 方向とし、床面南西端に原点を取った。

室内には 1 m 四方の熱源が 4 つある。部屋の南面 (Y=0) には窓があり、既知の貫流熱があるものとした。天井中央には 4 方向吹き空調機室内機がある。境界条件を Table 1 に示す。

また、観測点の配置を Fig.2 に示す。観測点は、設置が比較的容易であると考えられる天井や PC 裏側に設置することにした。特に、PC が発熱した際に生じる上昇気流を捉えるためには、観測点を天井に多数取り付けることが必要であると考えられる。なお、数値実験では観測誤差はないものとした。

2.2 数値実験の計算条件

数値実験では、PC を模擬した熱源からの発熱のみが未知であるとし、それ以外の境界条件は既知であるとした。Fig.1 の 1, 3 の熱源のみが 600 W で発熱するケースを正解ケースとし、1.3 節に示した手順で正解ケースの熱源分布と温度分布を推定した。

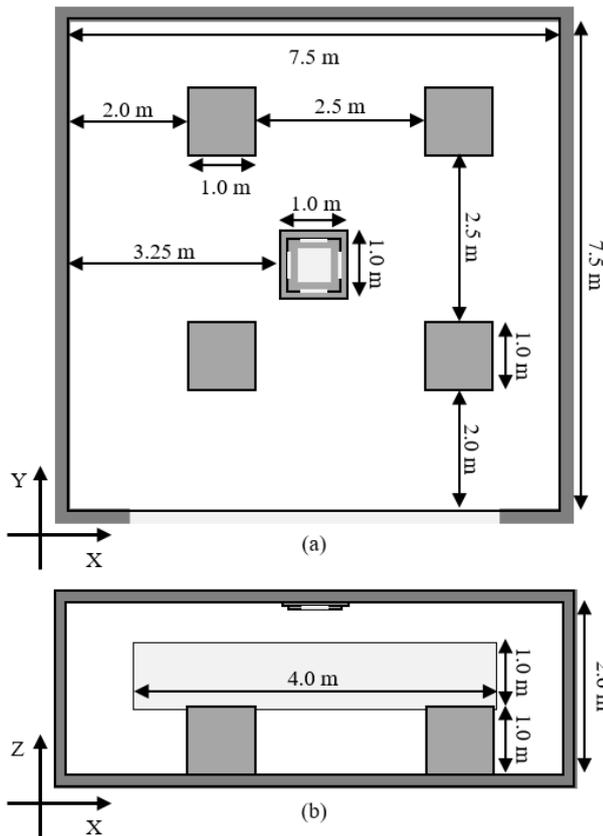


Fig.1 Objective room (a) plan view, (b) elevation view

Table 1 Boundary conditions

Boundary	Boundary condition
Inlet	Velocity: 0.49 m/s Direction: 45° Temperature: 20°C
Outlet	Gauge pressure: 0 Pa
South window	Velocity: No slip Heat transmission: 200 W/m ²
Northe, west, and east windows	Velocity: No slip Temperature: 32°C
Walls	Velocity: No slip Temperature: 30°C
Hot boes	Velocity: No slip Heat generation: 600 W

2.3 CFD シミュレーションの計算条件

CFD シミュレーションには、オープンソース CFD ツールボックスである OpenFOAM のバージョン 2.3 を用いた。非圧縮性定常流れを仮定し、ブシネスク近似により浮力を表現した。乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。支配方程式は運動方程式、連続の式、熱の保存式である。また、渦粘性、乱流拡散を考慮するために乱流エネルギー、散逸率の保存式を用いた。対流項の離散化には 2 次精度風上差分法（線形風上法）を、拡散項の離散化には 2 次精度中心差分法を用いた。速度と圧力の連成解法には SIMPLE 法を用いた。

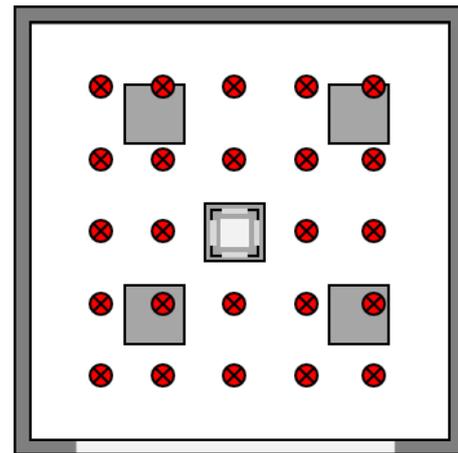


Fig.2 Observation points

2.4 正解値温度分布

例として、1 番と 3 番の熱源が発熱した場合について Fig.3 に示す。熱源の発熱がある場合、局所的な温度上昇により上昇気流が生じるとともに、室内空気温度が全体的に上昇している。

2.5 推定値温度分布

Fig.4 に SR 法を用いて推定した温度場を示す。熱源近傍での上昇気流の傾向を再現できているが、温度上昇幅が小さく、正解値温度場を再現しているとは言い難い。

SR 法による推定値を初期値として、VCA 法により推定した温度場を Fig.5 に示す。熱源直上での局所的な温度上昇をやや過小評価しているが、室内全体の温度分布をよく再現できている。

2.6 推定値の精度評価

Fig.6, Fig.7 に発熱量の推定結果と正解値と比較した場合の室内の温度場の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を示す。

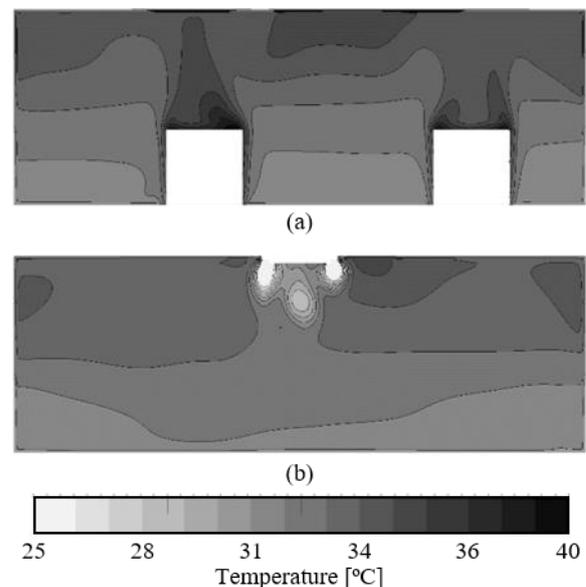


Fig.3 Correct temperature field with hot box 1 and 3
(a) X=3.75 m, (b) Y=3.25 m

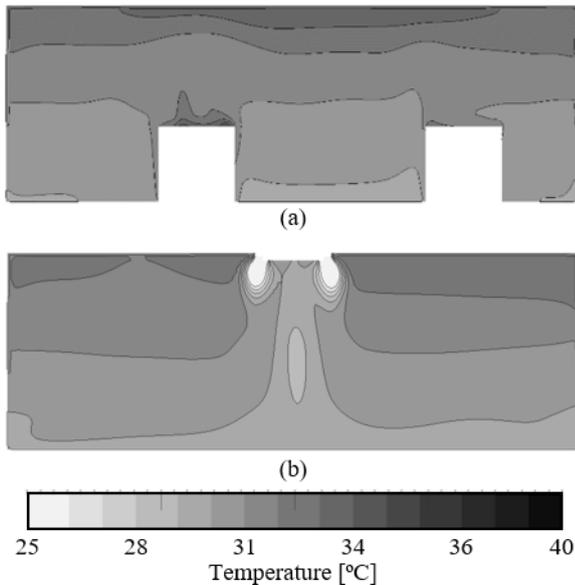


Fig.4 Temperature field estimated by SR method
(a) X=3.75 m, (b) Y=3.25 m

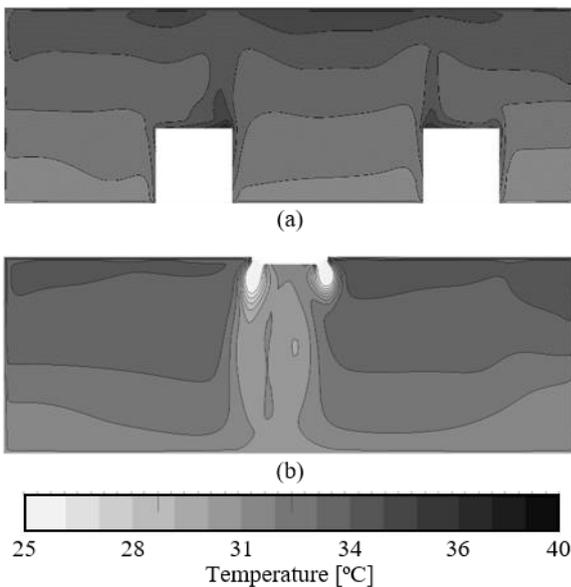


Fig.5 Temperature field estimated by SR-VCA method
(a) X=3.75 m, (b) Y=3.25 m

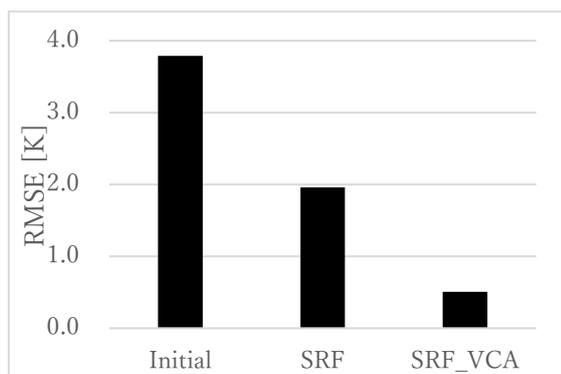


Fig.6 RMSE between correct and estimated temperature

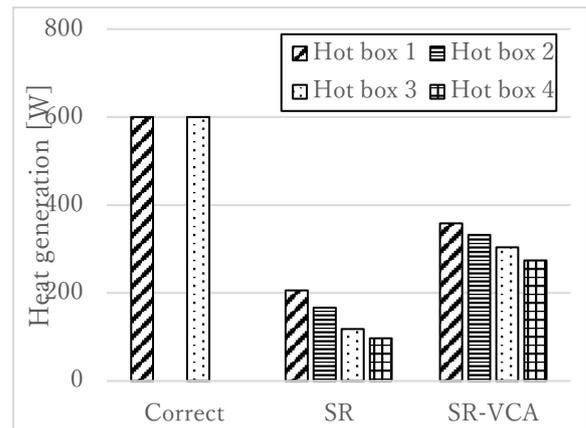


Fig.7 Correct and estimated heat generation

Fig.6より、温度場の誤差はSR法、VCA法の適用により大きく減少している。一方で、Fig.6に示したように、発熱量の分布は実際には発熱のない熱源2や4でも発熱しており、正解値を再現できていない。これは、観測点を設置した天井付近では高温部が一樣に広がっており、熱源による局所的な分布が見られないためだと考えられる。

3. 結論

本研究では室内に未知の熱源がある場合にも室内温熱環境を正確に推定するための手法として、データ同化法の研究を行っている。本報では、ソース・レセプター関係を用いて推定初期場を作成することによる、VCA法による温度場の推定精度の向上を検討した。

数値実験の結果、データ同化によって温度場の推定精度は大きく上昇したが、発熱量の分布はうまく推定することができなかった。これは、観測点の設置位置に起因するものだと考えられたため、今後、観測点の設置位置について検討を行う。

参考文献

- 1) 松尾智仁, 近藤明, 嶋寺光, 塩地純夫, 小松明. 連続的データ同化法 (VCA法) を用いた室内環境推定手法の開発 (第5報) 空調機吸込み温度を用いた壁面貫流熱の推定. 平成28年度空気調和衛生工学会大会, 高知, 2017
- 2) 加藤信介, 小林光, 村上周三. 不完全混合室内における換気効率・温熱環境形成効率評価指標に関する研究 第2報——CFDに基づく局所領域の温熱環境形成寄与率評価指標の開発. 空気調和・衛生工学論文集, Vol.69, pp.39-47, 1998
- 3) Cai, H., Li, X., Chen, Z., Wang, M.: Rapid identification of multiple constantly-released contaminant sources in indoor environments with unknown release time, *Building and Environment*, 81, 7-19 (2014).
- 4) Keats, A., Yee, E., Lien, F.: Bayesian inference for source determination with applications to a complex urban environment, *Atmospheric Environment*, 41, 465-479 (2007).